

## **ANÁLISIS DE REACTIVIDAD DE ROCAS MEDIANTE PETROGRAFÍA**

*Marfil S. A.*

*Dpto. de Geología. Universidad Nacional del Sur. San Juan 670. 8000 Bahía Blanca.*

*Investigador de la CIC de la Prov. de Buenos Aires. smarfil@uns.edu.ar*

### **RESUMEN**

Se evalúa la potencial reactividad de los principales minerales y rocas utilizados como agregado para hormigón. Para tal fin, puede calificarse a las rocas como: graníticas (ígneas y metamórficas granudas), volcánicas y sedimentarias (litificadas), a las que deben agregarse conglomerados y arenas. Se debe analizar las características físicas, mineralógicas y texturales que definirán su comportamiento en el hormigón. Muchas de las partículas que constituyen los agregados pétreos están recubiertas parcial o totalmente por carbonatos, sílice, material arcilloso/limoso, materia orgánica, sulfatos o por otros sedimentos los que dificultan seriamente su determinación. Aún con ayuda de estereomicroscopio, sólo podrá observarse la superficie externa cubierta y no se identificará la composición litológica de la partícula. Por ello debe recurrirse al uso de microscopio petrográfico sobre secciones delgadas. Los componentes líticos de gravas y arena pueden estar enmascarados superficialmente por sílice criptocristalina o por óxidos de hierro asociados con sílice, tornándolos potencialmente reactivos frente a los álcalis lo que podrá ocasionar reacciones deletéreas en el hormigón que tiendan a disminuir sus prestaciones durante la vida útil de la obra.

### **ABSTRACT**

The main minerals and rocks of the earth's crust that are used as aggregates for concrete will be considered in this work. For this purpose, rocks can be classified as granitic (grainy igneous and metamorphic) rocks, volcanic and sedimentary (lithified) rocks, as well as conglomerates, sands, silts and clays (non-consolidated). The great part of metamorphic rocks have been excluded from this simplification, in particular those presenting fissility (shales), schistosity (schists in general) and mortar textures (cataclasites). They must be all rigorously treated since their physical, mineralogical and textural characteristics will define specific behaviors that would be damaging if they are added to concrete. Many of the particles making part of the rock aggregates are partially or totally covered by the deposition of carbonates, silica, clay/siltstone material, organic material, sulphates or by other sediments that makes difficult their determination. Even using a stereomicroscope only the external covered surface will be observed and the lithological composition of the particles will not be identified. If granitic rock or quartz are covered there will be no problem, but if soft clods, clay clods, volcanic glass, calcedonite or opalized sandstone are hidden there will be a serious problem. Deposits from river, glacial river or marine coastal origin show lithological composition highly varied. Lithic compounds of gravel and sand can be masked in the surface by cryptocrystalline silica or by iron oxide associated with silica, making them potentially reactive in the alkali presence what can cause deleterious reactions in concrete tending to decrease their features during the lifetime of the construction.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Este capítulo considerará a los principales minerales y rocas de la corteza terrestre, que son utilizados con frecuencia como agregados para hormigón. Estas últimas se clasificarán en tres grupos basados en su origen: rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias dejando explicitado que existen zonas grises como pueden ser las tobas (rocas ígneo-sedimentarias), las migmatitas (rocas ígneo – metamórficas) y los granitos de anatexis (rocas ígneo – sedimentarias – metamórficas).

A los fines de su utilización como agregados para hormigón, la clasificación podría simplificarse y calificarse a las rocas como graníticas (ígneas y metamórficas granudas), volcánicas y sedimentarias (consolidadas), teniendo en cuenta que deben agregarse conglomerados, arenas, limos y arcillas (inconsolidados). Dentro de esta simplificación han quedado excluidas la mayoría de las rocas metamórficas, especialmente aquellas que presentan fisilidad (pizarras), esquistocidad (esquistos en general) y texturas de mortero (cataclasitas). Todas ellas deben ser tratadas con rigurosidad por las características físicas, mineralógicas y texturales que definirán comportamientos específicos muchos de los cuales podrían resultar perjudiciales si se incorporan al hormigón.

Debe tenerse en cuenta que rocas composicional y texturalmente semejantes, por la acción de procesos termodinámicos que conducen a la deformación de las estructuras de sus componentes pueden modificar su comportamiento. Por ejemplo: el cuarzo es un mineral inocuo, pero si está deformado (desarrollo de extinción ondulante) se comportará como un mineral potencialmente reactivo dependiendo del grado del tectonismo que lo afectó, y si estas condiciones se intensifican y culminan con un microfracturamiento llegando a la policristalinidad, cambiará hasta la superficie específica del mineral original.

Al evaluar una roca debe considerarse también su grado de alteración ya que dependiendo de éste sus posibilidades de reaccionar con los álcalis son totalmente distintas. La adecuada identificación de los minerales y rocas constituyentes de los agregados es de vital importancia para predecir su comportamiento en servicio. Además de la composición hay que considerar su estabilidad en un medio fuertemente agresivo como es el hormigón de cemento portland. Otro factor a tener en cuenta es el grado de exposición y humedad al cual estará sometida la obra. Se debe poner especial cuidado en la presencia de componentes fácilmente lixiviables que pueden producir reacciones químicas, minerales con alta capacidad de intercambio catiónico y/o de absorción de agua que puedan aumentar de volumen, minerales muy blandos, friables, con marcados planos de clivaje o exfoliación que puedan afectar las propiedades físicas y la presencia de crustificaciones superficiales que afecten el grado de adherencia con la matrix.

## **2. LOS MINERALES Y ROCAS COMO AGREGADO PARA HORMIGON (1)**

### **2.1 Estabilidad Química**

Si bien la mayoría de los minerales y rocas formados a elevada presión y temperatura son metaestables bajo las condiciones ambientales, las principales

especies que producen reacciones deletéreas tipo RAS, cuando son utilizadas como agregados en hormigón y que pueden afectar seriamente la durabilidad de las obras son: el vidrio volcánico, las variedades de sílice amorfa, micro y policristalina y el cuarzo tensionado con elevado ángulo de extinción ondulante.

Estas especies en medios fuertemente agresivos como es el pH elevado del hormigón tienden a solubilizarse (hidrolizarse), liberando sílice y elementos alcalinos que se combinan para formar en principio geles que luego cristalizan con el consecuente incremento de volumen.

Estas reacciones se producen si, además de las condiciones químicas, se dan factores tales como alto contenido de álcali y humedad. La temperatura también favorece su desarrollo. A las especies deletéreas que puedan contener los agregados, deben sumarse las adherencias superficiales de minerales arcillosos expansivos (del tipo montmorillonita) o sílice criptocristalina.

## **2.2 Resistencia Física y/o Mecánica**

En este punto se deben tener en cuenta dos aspectos principales. El primero vinculado a las características estructurales de los minerales y rocas dados por desarrollo de planos de clivaje muy perfecto en una dirección (micas), planos de fisilidad o esquistosidad muy marcados (filitas, esquistos, pizaras) y rocas sedimentarias finamente estratificadas. Esto disminuye notablemente la resistencia de los materiales en esos planos lo que provoca su desintegración o rotura en esas direcciones, degradando las estructuras que lo contienen.

El otro aspecto está vinculado con la dureza de los clastos del agregado, por ejemplo la presencia de minerales de alteración tipo montmorillonita, terrones blandos, o rocas blandas o muy alteradas, que lo tornan deleznales.

La presencia de crustificaciones superficiales provoca, por otra parte una notable disminución en la adherencia agregado/mortero, llegando en muchos casos a la separación total.

## **3. ENSAYOS NORMALIZADOS**

Existen normas que especifican los requisitos a tener en cuenta para realizar los estudios petrográficos de los materiales a ser utilizados como agregados. Entre ellas puede citarse la norma IRAM 1649 (Aridos para hormigón. Examen petrográfico)(2), IRAM 1531 (Aridos gruesos para hormigones de cemento portland)(3) e IRAM 1512 (Arido fino natural para hormigones de cemento portland)(4).

Para que el agregado sea aceptado no debe contener sustancias nocivas (terrones de arcilla, partículas blandas, ftanita “chert” contenido como impureza y no como uno de los constituyentes principales, materia carbonosa, sulfatos expresados como anhídrido sulfúrico

Y otras sales solubles) en proporciones mayores a las indicadas en las normas IRAM 1531 y 1512 y la suma de los valores obtenidos no deberá superar el 5 %.

Petrográficamente debe ser analizado desde el punto de vista de la reacción álcali agregado, en especial cuando la obra estará sometida a la acción de humedad. Para ser aceptado el contenido de especies deletéreas no debe superar los porcentajes indicados en la tabla 1.

*Tabla 1: Examen petrográfico (IRAM 1531)*

Rocas y minerales	% máximo
Opalo y ftanita ("chert") opalizada	0,25
Ftanita ("chert") cuarzosa o calcedónica	5
Riolitas, dacitas, latitas o andesitas, vítreas o criptocristalinas y sus correspondientes tobas, ceolitas y vidrio volcánico	3

La norma IRAM 1649 establece que las muestras deberán tomarse por o bajo supervisión directa de un geólogo familiarizado con el muestreo de rocas, grava, arena, etc. Junto con la muestra deben remitirse datos, lo más completo posibles sobre la ubicación exacta del lugar de extracción de la muestra, de la geología de la zona y de otros aspectos que puedan considerarse de interés. Si la cantera no está en explotación, las muestras deberán extraerse por medio de testigos de perforación, en el espesor que se espera productivo como material sano. En canteras en exploración o en depósitos de arena o grava la muestra se extraerá de las pilas de almacenamiento y constará de por lo menos 45 Kg o 300 trozos de cada tamaño de material a examinar. De los depósitos de arena y grava no explotados se deberá extraer por medio de calicatas a la profundidad de la futura explotación económica.

### **3.1 Arena y Grava Natural**

El análisis petrográfico debe realizarse sobre el retenido en cada fracción y luego efectuar los cálculos teniendo en cuenta los porcentajes retenidos en cada tamiz. Se comienza por las fracciones mayores y deberán ser analizadas al menos 300 partículas de cada fracción de tamiz.

En el canto rodado se debe establecer si presenta revestimiento. En caso afirmativo, se determina si puede estar constituido por productos deletéreos en hormigones tales como ópalo, yeso, sales fácilmente solubles, materia orgánica. Además se debe determinar el grado de adhesión del revestimiento a los cantos rodados. Las fracciones retenidas en cada tamiz deben ser seleccionadas en tipos de rocas por estudio visual. Si la mayoría de los grupos presentes son fácilmente identificables macroscópicamente por el estudio de la superficie natural, no es necesaria una identificación posterior. En el caso de rocas de grano fino, no identificables macroscópicamente, o que puedan ser o contener constituyentes deletéreos al ser usados en hormigones, deben verificarse con lupa estereoscópica. Si esta identificación no fuera suficiente se utiliza un microscopio petrográfico. Las exigencias del trabajo se adecuarán a la mayor o menor información requerida para cada muestra en particular.

Agrupados los distintos tipos de roca, se examinan para determinar si debe realizarse una separación adecuada a su condición física. Si todas las partículas de

una roca tipo están en condiciones comparables, este hecho debe ser registrado. Frecuentemente en un grupo se encuentran partículas con diferente grado de alteración, en ese caso deben ser seleccionadas según categorías determinadas por un probable comportamiento en el hormigón, de acuerdo con la siguiente clasificación: a) fresca, densa; b) moderadamente alterada; c) muy alterada ó a) densa; b)porosa (o porosa y friable). Usualmente no es práctico reconocer más que tres estados por tipo de roca y uno o dos pueden ser suficientes.

Durante el estudio se registra para cada tipo de roca la forma de partículas, superficie, tamaño del grano, textura y estructura, incluyendo observaciones de espacios porales, empaquetamiento de granos, cementación de granos, color, composición mineralógica, heterogeneidades significativas, condiciones físicas generales del tipo de roca en la muestra y presencia de constituyentes conocidos que puedan provocar reacciones químicas deletéreas en el hormigón. El recuento de partículas debe ser registrado de tal forma que las tablas puedan incluirse en el informe. Las tablas deben prepararse mostrando la composición y estado de las muestras por fracciones de tamiz y la composición promedio pesada basada en la gradación de la muestra recibida y la distribución de constituyentes por fracciones de tamiz.

En los testigos de perforación se examina cada testigo y se prepara un perfil mostrando el espesor, ubicación y espaciado de fracturas, planos de clivaje, tipo o tipos litológicos, alternancia de tipos, condiciones físicas y variaciones en su estado, tenacidad, dureza, coherencia, porosidad evidente, tamaño del grano, textura, variaciones en el tamaño del grano, textura, tipo o tipos de roturas y presencia de constituyentes de reacciones deletéreas en el hormigón.

En el examen de rocas, el procedimiento es el mismo que para el estudio de testigos, con la extensión que el espaciado de muestras y tamaños de las piezas individuales lo permita. Si la muestra consiste en cantidades relativamente grandes de material pétreo, roto por voladuras (en canteras), es necesario inspeccionar el total de la muestra, estimando la abundancia relativa de tipos de rocas o variedades presentes y obtener muestras de cada tipo antes de su ulterior procesamiento.

Los cálculos se realizan tomando la composición de cada fracción de tamiz se expresa sumando el número total de partículas de la fracción recontada y calculando cada constituyente en cada estado como porcentaje de la cantidad total y como número de partículas en porcentaje, en cada fracción del tamiz. Es conveniente calcular y registrar los porcentajes hasta el décimo. Se multiplica el porcentaje de cada constituyente en la fracción de tamiz por el porcentaje de la fracción de tamiz en la muestra total. Es conveniente calcular los porcentajes al décimo. Se adicionan a los porcentajes en peso de cada constituyente en cada fracción de tamiz el porcentaje en peso de cada constituyente que debería obtenerse en la muestra total.

Se construye una tabla para mostrar la composición de cada fracción de tamiz y la composición en peso de la muestra total. Los valores se informan redondeando a cifra entera. Los constituyentes menores al 0,5 % se informan como vestigios.

El informe debe describir cualitativamente y si es posible cuantitativamente las propiedades o constituyentes que tienen efectos desfavorables en el hormigón.

Debe incluir recomendaciones respecto a cualquier investigación adicional petrográfica, química, física o geológica, que pueda ser requerida para evaluar propiedades adversas que han sido indicadas por la realización del examen petrográfico. Investigaciones petrográficas suplementarias pueden incluir análisis cuali o cuantitativo de los agregados o de porciones seleccionadas de la misma por difracción de rayos X, análisis térmicos (TG,DTA, DTG, DSC) u otros procedimientos que aporten al conocimiento de un agregado.

#### **4. ESTUDIO PETROGRÁFICO DE LOS AGREGADOS:**

##### **4.1 Macroscopía – Estereomicroscopio**

La identificación de los minerales y rocas que constituyen los agregados en el hormigón es de vital importancia para determinar si existen componentes potencialmente deletéreos que puedan provocar daño en el material objeto de estudio. En el caso que se haya presentado alguna patología, como puede ser el desarrollo de la reacción álcali - sílice permitirá concluir cuales fueron las especies responsables del deterioro. Para este estudio, la preparación de la muestra es muy sencilla. Los minerales y rocas pueden ser examinados sin montaje especial, cristales pequeños, minerales en grano suelto y muestras de varios cm de espesor ya sean opacas o transparentes y con un orden de magnificación de hasta unas 100 veces.

Debe tenerse en claro el concepto de la estabilidad de los materiales que constituyen los agregados en las condiciones fisicoquímicas del hormigón. Bajo estas condiciones materiales como el vidrio volcánico se tornan metaestables, liberando sílice, alúmina y álcalis al medio los que estarán disponibles para reaccionar formando especies estables en estas condiciones como son aluminosilicatos alcalinos. Estos materiales tienen alta capacidad de incorporar agua y de intercambio catiónico lo que produce incrementos importantes de volumen con el consecuente desarrollo de presiones expansivas en la masa del hormigón.

Debe considerarse que además del vidrio volcánico fresco, (frecuente en arenas naturales), debe sumarse las pastas vítreas de las rocas volcánicas, las que en muchos casos han sufrido procesos de alteración (desvitrificación), previo a su incorporación como agregado en el hormigón. En general se alteran a minerales arcillosos. Si son del tipo montmorillonita, ésta sumará al problema de la RAS, degradación en el hormigón por su alta capacidad de hinchamiento e intercambio catiónico. El vidrio volcánico presente en los agregados por lo tanto es un material potencialmente deletéreo en hormigones con elevado contenido de álcalis en su composición. Su presencia es fácilmente detectable por métodos petrográficos ya que se comporta como una sustancia amorfa. Se debe poner especial cuidado en los minerales del grupo de la sílice. Esta es metaestable en medio alcalino y altamente soluble. La degradación de las variedades de minerales de este grupo dependerá de su estructura cristalina. El cuarzo es más resistente y por lo tanto estable. Pero por ejemplo el cuarzo con extinción ondulante, (cuarzo tensionado), microcristalino y de grano fino son considerados potencialmente reactivos frente a la RAS. Su velocidad de reacción es muy lenta por lo que en general no es detectado en los métodos de ensayo convencionales tales como barras de mortero, (ASTM C-227(5) - IRAM 1637(6)) método acelerado (ASTM C-1260(7) - IRAM 1674(8)) y el

prisma de hormigón (IRAM 1700(9)), (en general, si se aplican, debe extenderse el tiempo del ensayo, más que el establecido en la norma). También en el método de ensayo químico (ASTM C-289(10) - IRAM 1650(11)), la cantidad de sílice disuelta determinada es baja. De allí la importancia del análisis petrográfico, éste permite la identificación de estos materiales con microscopio de polarización, podrá alertar sobre su potencial reactividad y permitirá fijar pautas que condicionen los ensayos complementarios. El cuarzo tensionado se presenta tanto en el agregado fino como en el grueso constituyendo principalmente rocas metamórficas (cuarcitas), e incluso rocas graníticas que han sufrido procesos de deformación. En las rocas sedimentarias (areniscas silíceas), la matrix por lo general es criptocristalina o amorfa y por lo tanto, altamente lixiviable en el hormigón.

La calcedonia, tridimita y variedades de sílice criptocristalina son altamente reactivas. Son frecuentes de encontrar como clastos aislados de areniscas o como fragmentos de rocas principalmente de origen volcánico (riolitas, riodacitas, dacitas). Abundan en las crustificaciones superficiales de cantos rodados y agregados finos, individualmente o asociados a procesos de carbonatación y silicificación.

Cuando se realiza el estudio petrográfico de un agregado deben identificarse sus minerales de alteración. No se debe definir genéricamente, por ejemplo las vulcanitas, ya que éstas pueden contener o no vidrio volcánico y si lo tienen, puede estar fresco o alterado. Muchas veces los agregados están enmascarados por pátinas superficiales que no permiten ver su composición petrográfica.

El primer paso es realizar el estudio macroscópico y con estereomicroscopio. En esta etapa es importante definir la forma, tamaño, resistencia, fisilidad y/o esquisosidad, minerales deleznales, terrones blandos, materiales arcillosos, presencia de pátinas superficiales que enmascaran la composición y puedan disminuir la adherencia del hormigón. En general se separan en grupos que luego se estudiarán en detalle ayudado con microscopio de polarización sobre secciones delgadas. Esto es importante en especial cuando los materiales son de grano extremadamente fino que no hacen posible definir la presencia de vidrio y/o materiales deletéreos. En la Fig. 1A se muestra una imagen vista con estereomicroscopio del material retenido en el tamiz N° 30. Está constituido principalmente por cuarzo (teñido por óxidos de hierro) y rocas volcánicas.

#### **4.2 Microscopía de Polarización:**

El estudio sobre secciones delgadas permite el análisis detallado, la determinación de la composición petrográfico - mineralógica de los agregados gruesos y finos y las alteraciones que presentan. Es fundamental antes de decidir la utilización en hormigón ya que como se dijo anteriormente, las observaciones macroscópicas o con estereomicroscopio no permiten determinar las rocas de grano fino, en especial el grado de alteración que presentan. En la Fig. 1B se muestra una arena silícea donde es posible reconocer cuarzo con extinción ondulante.

El microscopio que se utiliza para este estudio varía si los minerales son transparentes u opacos. Estos últimos se cortan y se pulen hasta obtener una superficie brillante especular y se examinan con un microscopio de reflexión. Los

minerales transparentes se observan con microscopio de luz polarizada con luz transmitida y sobre secciones delgadas de 20 micrones de espesor.

#### **4.2.1 La sección delgada:**

Para la preparación de la sección delgada, la muestra debe pulirse hasta lograr una superficie espejada. Se pega sobre un portaobjeto con resina y se pule con un abrasivo (carborundum de diferentes mallas) hasta lograr el espesor de 20 micrones. La muestra se cubre con bálsamo de Canadá de índice de refracción conocido ( $n = 1,537$ ).

#### **4.2.2 El microscopio de polarización:**

El microscopio de polarización se emplea: con luz transmitida para examinar los minerales transparentes y con luz reflejada para los opacos. Se utiliza para determinar la mineralogía a través de las propiedades ópticas de los cristales individuales y/o de agregados y rocas, en la interpretación de texturas y en la determinación del grado y tipo de alteración.

Las características más distintivas que presentan son el polarizador y el analizador, situados respectivamente debajo y encima de la platina. También es característica la platina rotativa y varios accesorios como la lámina de yeso, lámina de mica y el condensador. Los oculares pueden ser micrométricos permitiendo medir las dimensiones de los objetos en el campo visual, el aumento en general es x8 o x10. Los objetivos son x5, x10, x20 y x50. Los minerales pueden examinarse con luz polarizada simple o con nicols cruzados. Sin analizador se puede determinar propiedades como el color, clivaje y pleocroísmo. Con nicol analizador las principales propiedades ópticas son: el color de interferencia, ángulo de extinción y elongación.

### **5. MINERALES TRANSPARENTES**

A continuación se dará una breve descripción de algunos de los minerales formadores de roca más frecuentes. Estos se encuentran en los agregados gruesos (canto rodado y piedra partida) como parte de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas y a medida que el tamaño de grano disminuye aparecen como minerales individuales en especial en las arenas (12,13,14,15).

#### **5.1 Minerales de sílice:**

Cuarzo: Es la variedad de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) más abundante y frecuente. Es un mineral duro, resistente a la meteorización por lo que es un componente muy abundante en las arenas y gravas. También es un constituyente principal en las rocas ígneas ácidas. Se puede presentar como mineral accesorio o secundario. Algunas rocas sedimentarias y metamórficas están constituidas por 100 % de cuarzo (cuarcitas).

Cuando está puro es incoloro, tiene fractura irregular, no presenta clivaje y es de brillo vítreo. En arenas y gravas adopta una morfología acorde con las condiciones de erosión, transporte y sedimentación y con la evolución del sedimento. Puede presentarse en granos absolutamente redondeados hasta irregular y anguloso y si es de grano extremadamente fino, adopta factura concoidal. Cuando está bien



cristalizado se comporta como inocuo en el hormigón (Fig. 1C) mientras que si ha sufrido procesos de deformación se transforma en potencialmente reactivo. En la Fig. 1D se muestra clastos de cuarzo de grano fino y con extinción ondulante, como consecuencia de los procesos de deformación que ha sufrido.

**Opalo:** Es una forma de sílice hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ). No tiene estructura cristalina definida. El color es variable, con tendencia hacia colores pardo-rojizos por la presencia de hierro en su estructura o tinción superficial. Presenta brillo resinoso a vítreo. Se encuentra con frecuencia en rocas sedimentarias, principalmente en chert, diatomitas y como cemento de areniscas. También es frecuente como mineral secundario rellenando cavidades y fisuras en rocas ígneas. Es un material muy metaestable en medio alcalino y reacciona con los álcalis del cemento. En clastos monominerales, es un constituyente común de arenas principalmente fluviales.

**Calcedonia:** Es una variedad de sílice fibrosa. Es un material metaestable en medio alcalino. Es frecuente su presencia en chert, ftanita, jaseroide y otras variedades de sedimentos de origen químico. Se presenta como relleno de cavidades o como reemplazo de fósiles, como material cementante de rocas sedimentarias y en forma masiva. También se presenta en calizas y dolomías, como nódulos, lentes y bandas. Aún en bajas proporciones cuando aparece como constituyente de los agregados los transforma en potencialmente reactivos. En la Fig. 1E se observa un clasto de calcedonia al microscopio de polarización

**Tridimita y cristobalita:** Son variedades de sílice microcristalina. Se encuentran en algunas rocas volcánicas y metamórficas, generalmente en cavidades. Ambos son metaestables a presión y temperatura ordinarias y se comportan como potencialmente deletéreos en hormigón de cemento portland. Estas formas de sílice son comunes en vulcanitas desvitrificadas, en tobas alteradas y en sedimentos cuyos cementos son silíceos. Es difícil su identificación, cuando son más o menos puras tienen fractura irregular aunque su identificación, que es imprescindible, debe realizarse con métodos específicos, puesto que las arenas o gravas que las contienen, aún en cantidades ínfimas, serán potencialmente reactivas.

## **5.2 Feldespatos:**

Constituyen un grupo muy abundante entre los minerales formadores de roca en la corteza terrestre. Se encuentran en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Son alúminosilicatos de sodio, potasio y/o calcio.

Se dividen en feldespatos potásicos y plagioclasas, diferenciados por su composición química y cristalográfica. Dentro de los primeros se encuentra la ortosa, sanidina y microclino. Las plagioclasas forman una serie isomorfa entre el extremo sódico (albita) y el cálcico (anortita), con miembros intermedios oligoclasa, andesina, labradorita y bitownita. Son muy estables en medio alcalino y suelen presentarse alterados a minerales arcillosos del grupo de la illita y/o caolinita, ya que se hidrolizan en medio ácido. En las arenas se las puede reconocer ya que es común encontrarlas en clastos monominerales por su color y fractura según clivaje. En general la ortosa y el microclino son rosados, opalescentes mientras que las plagioclasas y sanidina son grises a blanquecinos, enmascarados por la argilización

mencionada. En la Fig. 1F se muestra plagioclasa vista con nicoles cruzados, donde es posible observar la macla polisintética característica de estos minerales.

### **5.3 Minerales Ferromagnesianos: Olivinos, Piroxenos y Anfíboles**

Tanto las rocas ígneas como metamórficas contienen minerales oscuros o máficos que son generalmente silicatos de hierro y/o magnesio. Estos minerales incluyen el grupo de los olivinos, que forman una serie isomorfa entre el extremo de hierro (fayalita) y el de magnesio (forsterita); los piroxenos (el más común es la augita) y anfíboles (el más común es la hornblenda).

Si bien estos minerales son metaestables en el ambiente exógeno en especial los olivinos, no provocan reacciones deletéreas cuando constituyen agregados para hormigón. Son muy frecuentes constituyentes de las rocas básicas y ultrabásicas y menos, sobre todo los anfíboles y algunos piroxenos, de las ácidas. Se los puede encontrar en las arenas, pero debido a la facilidad de disgregación y a la susceptibilidad de meteorización, generalmente no son constituyentes monominerales comunes. Bajo esta forma se los identifica fácilmente por su color (negro, rojizo, verdoso) y sus clivajes característicos.

### **5.4 Micas**

Los minerales de este grupo se caracterizan por tener clivaje muy perfecto en una dirección y por lo tanto suelen formar láminas extremadamente finas. Cuando constituyen parte de los agregados pueden presentar problemas precisamente por esa propiedad.

Dentro de las micas se pueden hacer 2 grandes grupos. Las incoloras o levemente coloreadas: muscovita y las oscuras: biotitas. Están presentes en la mayoría de las rocas ígneas y metamórficas y en sedimentos especialmente en arenas. Se presentan en clastos aislados aún en tamaños muy pequeños. Si están alterados por lo común se presentan decolorados por pérdida de hierro y argilizados, dando clastos deleznales por la presencia de illita.

### **5.5 Minerales arcillosos**

Son aluminosilicatos hidratados que pueden contener K, Mg, Fe, y/o Ca entre los cationes principales. Son minerales secundarios, en general de grano muy fino, formados por alteración de los minerales primarios formadores de roca y del vidrio volcánico. Se pueden agrupar dentro del grupo de la montmorillonita, illita y caolín.

La montmorillonita tiene alta capacidad de intercambio catiónico y cambia de volumen por humedecimiento y secado. Esta propiedad lo torna un material peligroso cuando constituye parte de los agregados pétreos. Por lo común no se reconocen clastos de estos minerales, ni en los agregados gruesos ni en las arenas aunque son constituyentes principales de las lutitas, limolitas, arcillitas y de algunas rocas metamórficas y vulcanitas alteradas. Su identificación es dificultosa ya que su cristalinidad es pobre y su estructura no siempre es uniforme. Son comunes en los terrones blandos o deleznales.

## 5.6 Zeolitas

Este grupo de minerales está constituido por aluminosilicatos hidratados de elementos alcalinos, y alcalino térreos. Se caracterizan por su alta capacidad de intercambio catiónico y por su contenido variable de agua. Son minerales secundarios formados principalmente como relleno de cavidades, en el interior de fisuras dentro de las rocas ígneas, como producto de alteración hidrotermal o por procesos exógenos de los minerales primarios formadores de roca. Algunas zeolitas pueden producir efectos deletéreos en el hormigón, debido a su capacidad de aportar álcalis al medio, aunque son estables en medio alcalino. Son componentes principales de las tobas alteradas y comúnmente se originan a partir de las fases vítreas en medio alcalino (16).

## 5.7 Carbonatos

Los minerales más comunes de este grupo son calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) y dolomita ( $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ ). Son minerales blandos y solubles en medio ácido. La calcita (Fig. 2A) es el principal constituyente de las calizas sedimentarias y metamórficas (mármoles), aunque se encuentra en muchos otros tipos de roca. Aparece en cavidades de las rocas ígneas, como adherencia superficial, en venillas, rellenando diaclasas y en la mayoría de las rocas aflorantes de la corteza terrestre, especialmente cementando sedimentos modernos (tosca), muchas veces asociada a zeolitas. La dolomita es un mineral muy común, se la encuentra en vetas y yacimientos de reemplazo en calizas y dolomías sedimentarias y metamórficas (mármoles magnesianos).

Debe tenerse especial cuidado cuando el agregado presenta dolomita en su composición, en especial si es de grano fino ya que en medio alcalino se produce el fenómeno de dedolomitización dando como producto final calcita con un consecuente incremento de volumen que produce expansiones deletéreas en el hormigón. Esta diferenciación no es simple ya que es común que la dolomita aparezca asociada a calcita en calizas en muy baja proporción y su identificación es difícil. Debe realizarse a través de ensayos o métodos específicos para diferenciarlas (reacción química, tinción, DRX), ya que los métodos convencionales no resultan positivos. La dolomita reacciona con ácido en caliente.

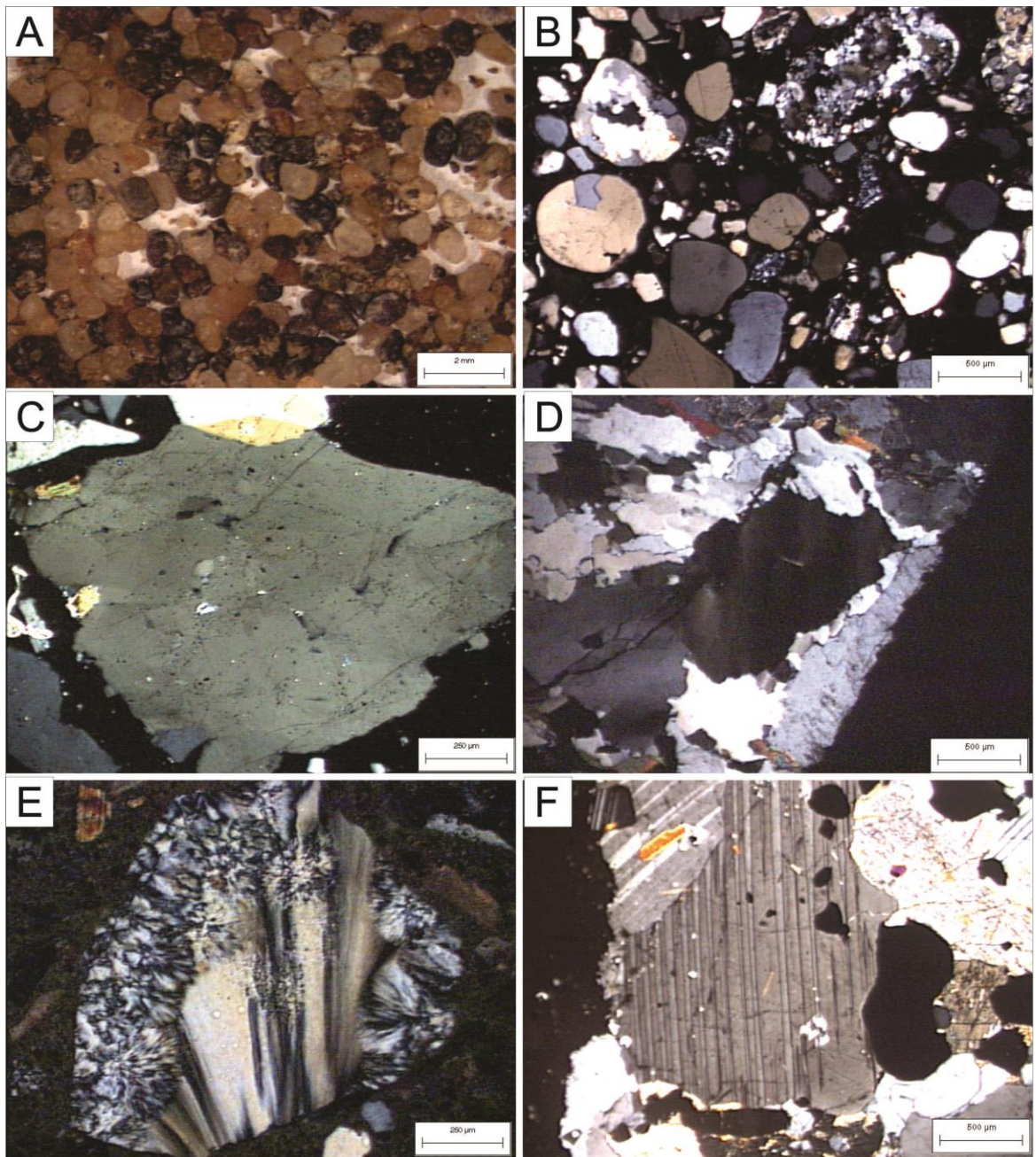
## 5.8 Sulfatos

El más común es el yeso ( $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), formado como consecuencia de la hidratación de anhidrita ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ), la que puede encontrarse en el yeso como mineral residual. El yeso aparece en venillas. Puede estar asociado a calcita, dolomita y halita. Es un constituyente común de las rocas sedimentarias, especialmente de depósitos salinos marinos y continentales precipitado por evaporación. En yacimientos sedimentarios está asociado a limos, arcillas y margas vinculado con la oxidación de sulfuros.

## 5.9 Óxidos e Hidróxidos de Hierro

Los óxidos de hierro más comunes son magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). De los hidróxidos se destaca la goetita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ). Los óxidos se presentan como minerales accesorios en muchas rocas ígneas oscuras y son comunes como detritos en arenas

y sedimentos. En muchas rocas sedimentarias aparece como cemento ferruginoso, como crustificaciones en clastos de grava o tiñendo rocas de cualquier origen.



*Figura 1: A. arena vista con Estereomicroscopio. B. arena vista al microscopio óptico sobre secciones delgadas. C. cuarzo. D. cuarzo con extinción ondulante. E. calcedonia. F. plagioclasas en una roca granítica.*

### 5.10 Otros Minerales

En las rocas ígneas y metamórficas hay un importante grupo de minerales no tan comunes pero que deben tenerse en cuenta. Sólo se mencionará su nombre: feldespatoides, granates, titanita, circón, epidoto, entre otros, los que al alterarse

pueden liberar, además de sus cationes, sílice, componente que debe considerarse ya que luego de la hidrólisis quedará disponible para reaccionar. Existen otros minerales tanto estables como metaestables que podrían participar de estos procesos como son pirita, pirrotina, goethita y apatito.

## **6. ROCAS**

De acuerdo a su origen se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estos tres grupos se subdividen de acuerdo a su composición química y mineralógica, textura y estructura interna. Constituyen agregados gruesos (piedra partida y canto rodado) y finos (arenas naturales y de trituración).

Cuando el agregado es piedra partida su evaluación es simple ya que generalmente está constituido por un solo tipo de roca, que podrá presentar a lo sumo variaciones texturales y en la intensidad de la alteración. Las arenas provenientes de la trituración de rocas tienen un tratamiento similar. El canto rodado y arena natural son más difíciles de evaluar ya que en general son agregados polimícticos constituidos por una variedad de rocas y minerales, en general de diferente origen, composición y grado de alteración. Por ello su examen debe abarcar el mayor número de clastos individuales o agrupados por semejanzas litológicas y ser exhaustivo. Debe ponerse especial cuidado cuando el agregado presenta pátinas superficiales que enmascaran la mineralogía y/o grado de alteración.

### **6.1 Rocas Ígneas (17)**

Se considera que entre el 65 y 70 % de la corteza terrestre está constituido por rocas ígneas, formadas por la consolidación de mezclas silicatadas fundidas (magma). Según la profundidad donde se formaron, se generarán las rocas plutónicas, hipabisales y volcánicas, profundas, intermedias y efusivas respectivamente, caracterizándose por una granulometría cristalina bien desarrollada, poco desarrollada o masivas de grano fino. Además teniendo en cuenta su quimismo se las denomina rocas básicas a aquellas que tienen bajo contenido de sílice y álcalis y alto hierro, magnesio y calcio y ácidas a aquellas con elevado contenido de sílice y álcalis y bajo de hierro, magnesio y calcio.

Las principales rocas ígneas plutónicas son granito, granodiorita, diorita y gabro y sus equivalentes volcánicas son riolitas, dacitas, andesitas y basaltos. En la superficie terrestre los afloramientos de estas rocas no son cuantitativamente homogéneos ya que la roca plutónica más abundante es el granito/granodiorita (roca ácida) (Fig. 2B) y la volcánica es el basalto (roca básica) (Fig. 2C).

Las rocas básicas, tanto plutónicas como volcánicas, se forman a mayor temperatura y en condiciones fisicoquímicas particulares por lo que cualquiera de sus componentes mineralógicos sufrirá procesos de desintegración más rápidamente al quedar expuestas al ambiente exógeno. Se meteorizará más rápido un olivino que un piroxeno y éste a su vez que un anfíbol. Fenómenos similares se desarrollarán entre una anortita y una albita y entre ésta y la ortosa. En las tablas 2 y 3 se comparan desde el punto de vista de la composición química las rocas mencionadas. La tabla II indica la mineralogía simplificada.

*Tabla 2: Composición química promedio de las rocas ígneas*

Oxidos principales	Gabro/ Basalto (%)	Diorita/ Andesita (%)	Granito- granodiorita / riolita-dacita (%)
SiO <sub>2</sub>	45 / 50	55 / 60	65 / 70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15 / 17	14 / 16	13 / 15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19 / 22	14 / 16	4 / 6
MgO	7 / 9	3 / 5	0,5 / 2
Na <sub>2</sub> O	2 / 3	4 / 5	5 / 6
K <sub>2</sub> O	0,5 / 1	3 / 4	3 / 6

*Tabla 3: Composición mineralógica promedio de las rocas ígneas*

Principales minerales	Gabro / Basalto (%)	Diorita / Andesita (%)	Granito-granodiorita / riolita-dacita (%)
Cuarzo	< 5	<10	25 / 35
Plagioclasa	45 / 55	50 / 65	30 / 35
Feld. alcalinos	< 5	< 10	25 / 30
Pirox. + anf. + biot.	20 / 25	10 / 15	< 5
Olivinos	5 / 10	-	-
Minerales opacos	2,5 / 5	1,5 / 4,0	0,5 / 2

Las rocas volcánicas, dependiendo de la velocidad de enfriamiento, generarán distintas cantidades y tipos de vidrio volcánico. La metaestabilidad del vidrio volcánico dependerá de la edad de la roca (a mayor edad, mayor desvitrificación), de su composición (son más vulnerables los vidrios básicos que los ácidos) de sus texturas (los más compactos y masivos son más resistentes que los porosos o de texturas perlíticas), del desarrollo de los procesos de alteración, factor que acelera notablemente la desvitrificación y de la condición química del medio que favorezca la hidrólisis. Una riolita holocristalina (Fig. 2D) tendrá un comportamiento semejante a un granito, pero si tiene texturas que indican presencia de vidrio (holohialina, vitroclástica, vitrofídicas) será altamente reactiva (Fig. 2E).

## **6.2 Rocas Sedimentarias (18)**

Las rocas sedimentarias se generan por la acción de la atmósfera, hidrósfera y biosfera sobre rocas preexistentes, ígneas, metamórficas o sedimentarias. Se producen por la descomposición física y/o química sobre los minerales y rocas desarrollándose una serie de procesos que van desde la disgregación hasta la hidrólisis, que conduce desde un aumento de la permeabilidad hasta el colapsamiento de las estructuras cristalinas liberando a aniones y cationes en medios que van desde ácido ( $\text{pH} \cong 4$ ) a alcalino ( $\text{pH} \cong 9$ ) y desde oxidante a reductor. Los procesos de separación de los materiales generados como consecuencia de la desintegración de las rocas y su posterior sedimentación, se denominan diferenciación sedimentaria, proceso que permite agrupar a los minerales en varios tipos: Resistentes: agrupa al cuarzo, circón, rutilo, titanita; Hidrolizados: arcillas, minerales de las bauxitas; Oxidados: óxidos de hierro y de manganeso; Carbonatos: calcita, dolomita, siderita; Evaporados: yeso, sales;

Reducidos: pirita, azufre, petróleo, carbón.

La diferenciación sedimentaria da lugar a la formación de sedimentitas de composiciones muy distintas. Es mucho más efectiva que la diferenciación magmática y sus productos finales contrastarán entre sí, tanto desde el punto de vista químico, como físico. El análisis químico es útil para comprender la evolución del material desde el punto de vista geoquímico e interpretar los sedimentos o diferenciarlos. Generalizando, puede decirse que los sedimentos tienden a enriquecerse en sílice, hierro y alúmina y a empobrecerse en calcio, magnesio y elementos alcalinos. Teniendo en cuenta el tamaño de los componentes litológicos de las rocas sedimentarias pueden agruparse como: sedimentos detríticos o clásticos y clasificarse por su tamaño decreciente como: grava, arena, limo y arcilla. Solo se considera el tamaño del grano y no su composición mineralógica ni química, características fundamentales a tener en cuenta cuando los sedimentos mencionados serán utilizados como agregados.

Los sedimentos de origen químico más comunes son: calizas, dolomías, cherts, ftanitas, siderita, óxidos e hidróxidos de hierro, glauconita, celadonita, fosforita, yeso, otros evaporados y residuos orgánicos. Como agregados pueden considerarse las calizas y dolomías. Estas últimas pueden resultar potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-carbonato y si contienen cantidades variables de sílice (generalmente como chert) y arcillas, también frente a la RAS. Todas las formas de sílice micro, cripto y policristalinas de cualquier tipo de sedimentos torna a estos potencialmente reactivos. En la tabla 4 se muestra la composición química de algunas rocas sedimentarias.

Los sedimentos pueden ser oligomícticos (constituidos por un solo mineral o roca) o polimíctico (integrado por varios minerales o rocas). De esta forma una arena puede estar constituida casi exclusivamente por granos de cuarzo, o de vulcanitas o por clastos de granito o por fragmentos de pizarras, etc. y seguirá siendo arena mientras se mantenga dentro de los límites de tamaño. Este mismo comentario es válido para las gravas. Cuando estos sedimentos son estudiados para establecer su incorporación a un hormigón, los componentes deben agruparse en conjuntos de minerales y rocas y de cada uno de ellos determinar la litología y/o mineralogía

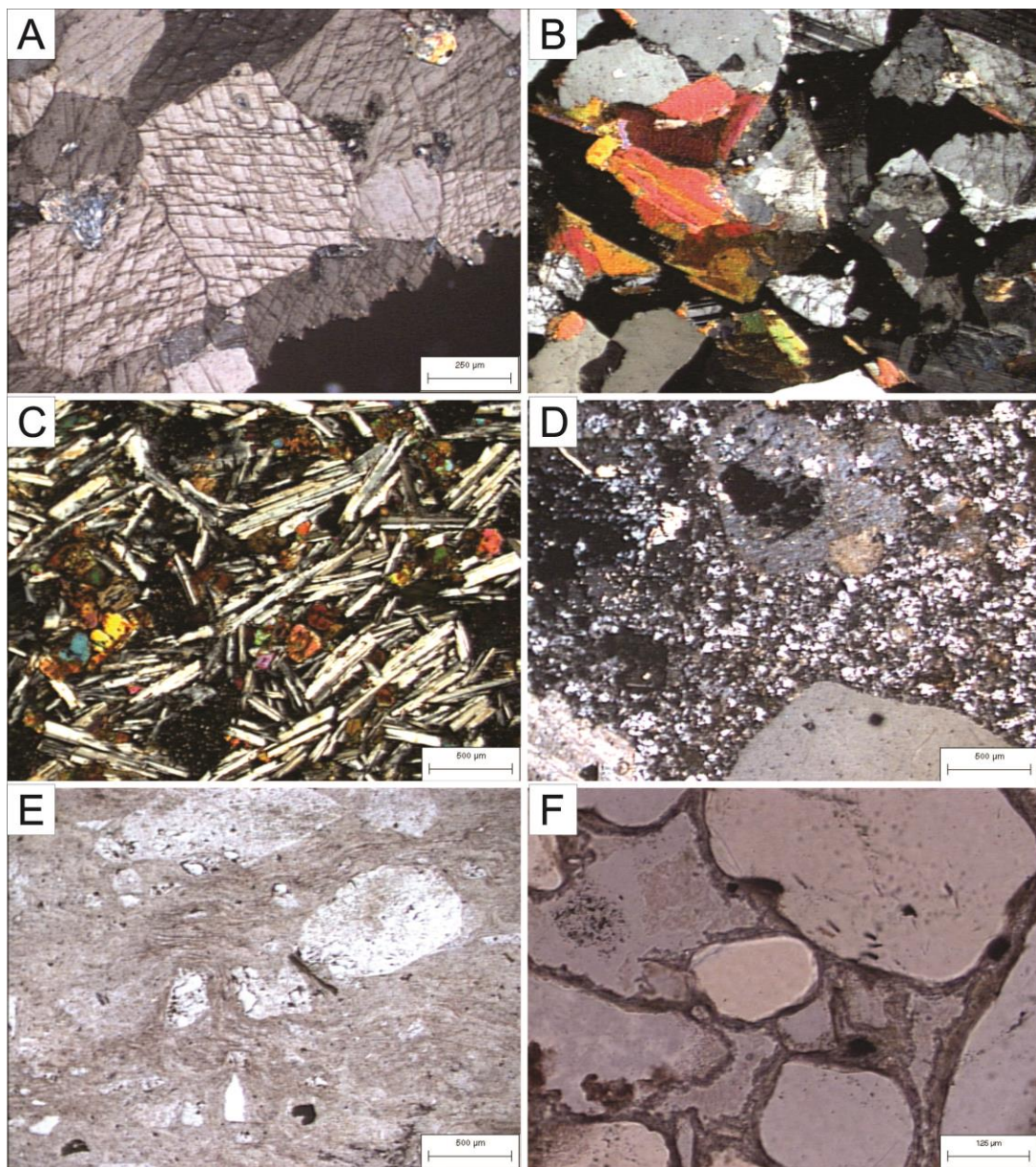
*Tabla 4: Composición química de las principales rocas sedimentarias*

Oxidos (%)	Areniscas	Lutitas	Arcillitas	Calizas	Chert
SiO <sub>2</sub>	70 / 95	60 / 70	50 / 65	0 / 10	90 / 95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 5	10 / 20	10 / 12	0 / 3	0 / 3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 / 5	4 / 8	5 / 10	0 / 0,5	0 / 1
MgO	1 / 2	0 / 1	2 / 4	3 / 6	0 / 0,5
CaO	1 / 3	2 / 4	0 / 1	35 / 40	0 / 0,5
Na <sub>2</sub> O	0 / 0,5	0,5 / 1,5	1 / 3	0 / 0,5	0 / 0,5
K <sub>2</sub> O	1 / 2	2 / 4	2 / 4	0 / 0,2	0 / 0,3

Los sedimentos consolidados, conglomerados, brechas, areniscas, lutitas, arcillitas, etc., están constituidos por los sedimentos correspondientes cementados por sílice, carbonatos, cementos ferruginosos. El proceso de cementación natural se realiza a



partir de agua rica en los iones mencionados y por reacción química, consolidan al sedimento, procesos generalmente agrupados bajo la denominación de litificación y diagénesis. Pueden contribuir a ellos la temperatura y la presión dependiendo de las condiciones donde se desarrolla el proceso. Los sedimentos consolidados para su uso en hormigón son considerados como una roca y deberán ser sometidos a trituración para obtener el tamaño adecuado. Los cementos silíceos o la sílice contenida en los cementos carbonáticos o ferruginosos, presentan elevados índices de lixiviación, razón por la cual deben ser estudiados con mucho detalle. En la Fig. 2f se muestra una arenisca silícea, constituida por clastos de cuarzo cementados por sílice criptocristalina.



*Figura 2: A. calcita. B. roca granítica. C. basalto. D. riolita cristalina. E. riolita vítrea. F. arenisca silícea.*



### **6.3 Rocas Metamórficas (19)**

Durante el metamorfismo las rocas de la corteza terrestre están sometidas a cambios por la acción de la temperatura, presión, tensiones de diferente tipo y actividad química. El metamorfismo puede ser puramente mecánico o térmico sin modificaciones químicas importantes aunque hay cambios texturales y mineralógicos. Cuando en el proceso se producen aportes o salidas de materiales principalmente gases magmáticos se desarrollará un proceso pneumatolítico y si predominan los fluidos el proceso será hidrotermal. Si el proceso llega a tal temperatura y presión que se alcanza a la fusión parcial, se estaría desarrollando la migmatización y si es total se alcanzará la anatexis.

Las características petrográficas de las rocas metamórficas permiten diferenciar cada uno de los procesos citados aunque las zonas de transición entre la diagénesis y el metamorfismo de bajo grado y entre el metamorfismo y la fusión total es dificultosa. Si bien algunos de los sedimentos de origen químico son fuertemente afectados por el metamorfismo (calizas y dolomías se transforman en mármoles), los sedimentos de mayor incidencia en los diferentes procesos metamórficos son las arenas y las arcillas. Originarán gneises, filitas, micacitas, esquistos, etc. Una arena rica en cuarzo generará una cuarcita. Si se compara la composición química, se notarán cambios insignificantes, principalmente manifestados en los elementos alcalinos y alcalino térreos. Cuando se utilizan rocas metamórficas como agregados para hormigón, los factores más importantes a tener en cuenta son: las condiciones de formación de las nuevas especies ya que serán más inestables los minerales formados a mayor presión y temperatura y la deformación que presentan (principalmente el cuarzo).

### **6.4 Rocas Piroclásticas y Tobas**

Las rocas piroclásticas son originadas por materiales eyectados en las erupciones volcánicas. Según su tamaño pueden clasificarse como bombas (fragmentos mayores a 32 mm), lapilli (entre 4 y 32 mm), toba (entre 0,25 y 4 mm) y más finos se agrupan como tobas finas o cenizas. Por cementación o compactación forman rocas que adquieren distintas denominaciones, que pueden generalizarse como tobas donde se agrupan las cenizas litificadas y los demás tipos mencionados. Estas rocas están constituidas principalmente por vidrio volcánico, cristales y clastos líticos. Si predomina el vidrio o partículas vítreas se denominan “tobas vítreas”, si predomina la fracción cristalina “tobas cristalinas” y si predominan los fragmentos líticos “tobas líticas”. Además estos componentes son comunes a casi todos los sedimentos por lo que a las arcillas, limos, arenas y gravas que contienen un porcentaje importante de tobas se les agregará la denominación “tobáceas”. Por sus características petrográficas (por lo general muy vesiculares) y físicas (materiales livianos) hace que durante su distribución sufran procesos de diferenciación importantes, tanto por la acción del viento como por el agua ya que algunos son tan livianos que pueden alejarse considerablemente de la fuente de origen y hasta flotar en el agua. Esta característica hace que su participación en los sedimentos sea totalmente distinta dependiendo de su cercanía al centro emisor.

A su vez el retrabajado de un sedimento produce importantes variaciones horizontales y verticales aún dentro de un mismo yacimiento. Composicionalmente,

si bien son, por mucho, más abundantes las tobas ácidas (riolíticas y dacíticas), también se producen las basálticas y andesíticas. En general puede asegurarse que estos materiales rápidamente se meteorizan ya que el vidrio es metaestable, son muy permeables y están expuestos en medios químicos totalmente diversos. En un ambiente alcalino, originarán montmorillonita (saponita, nontronita, si la toba es básica), beidelita y se caolinizarán si el medio es ácido, existiendo fases transicionales entre estos extremos. En todos los casos hay un excedente importante de sílice que comúnmente cristalizará como tridimita, cristobalita, ópalo y/o calcedonia originando una silicificación que podrá constituirse en el proceso de cementación más importante de la litificación.

Cuando estas rocas son identificadas como componentes de agregados tanto gruesos como arena, deben tomarse todos los recaudos necesarios para prever su potencial reactividad, especialmente determinar su composición mineralógica, litológica, textura y alteraciones dirigiendo la atención a la presencia de vidrio volcánico, fresco, alterado, relíctico y a la identificación de los minerales de alteración, montmorillonita, ceolitas y arcillas. Además de definir las características de la sílice y demás componentes del cemento de la toba su porción cristalina y lítica, puede ser importante, relacionarla con su origen ya que es aceptado que las tobas más antiguas que el Terciario no tendrían vidrio relíctico y las formas de sílice metaestables habrían adquirido cierta estabilidad.

## **7. ALTERACIONES (20, 21, 22)**

Prácticamente no existen rocas expuestas en el ambiente exógeno que no muestren evidencias de la acción de procesos erosivos sean estos físicos, químicos o biológicos. Pueden afectar a las rocas a distinta profundidad, dependiendo de la permeabilidad, del grado de fracturamiento, de su composición mineralógica y textura. Los principales procesos químicos que se desarrollan son hidratación, hidrólisis, oxidación y reducción, acción del CO<sub>2</sub> (carbonatación) y disolución. Todos los minerales primarios al ser afectados por los procesos mencionados aumentarán su volumen, a veces considerablemente o aportarán iones al medio que lo tornará más agresivo. Estos procesos otorgan características físicas a las rocas alteradas, totalmente distintas a las de las frescas.

En la mayoría de estos procesos de alteración hay una tendencia a relacionar químicamente a la sílice y la alúmina tomando del medio los cationes disponibles y necesarios para formar las nuevas estructuras cristalinas, especialmente Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Fe<sup>++</sup>, etc. y si ello no es posible migrarán como iones solubles o acomplexados principalmente por la materia orgánica. En muchas de estas reacciones la cristalización de las nuevas especies mineralógicas consumirán parcialmente la sílice disponible. El exceso puede migrar como complejo solubilizado, si el medio es alcalino o precipitar en alguna de las formas de sílice, desde totalmente estable como cuarzo a una forma lábil como el ópalo.

Los agregados que serán utilizados en hormigones deben ser evaluados considerando el desarrollo de los procesos de alteración y calificando el nivel alcanzado. Entre los minerales primarios, los feldespatos pueden presentar caolinización (si el medio es ácido) o sericitización (si es neutro a levemente alcalino). En ambos casos habría exceso de sílice. Si el feldespato es una

plagioclasa es muy probable que también haya carbonatación (a pH levemente alcalino) proceso que fijará al calcio movilizado. La biotita, anfíboles y piroxenos al hidrolizarse liberarán hierro y magnesio dando lugar a la cristalización de cloritas. Este grupo de minerales incorporará los cationes mencionados, junto con la sílice y alúmina disponible. En todos los casos la sílice estará en exceso dando lugar a la cristalización de algunas de sus formas cristalinas ya que el medio será levemente ácido a neutro. A pesar de que el cuarzo es un mineral muy resistente y las demás formas de la sílice no tanto, el medio que se desarrolla en el hormigón es muy alcalino y por lo tanto, todas las superficies estarán expuestas a su lixiviación.

## **8. ENMASCARAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LOS AGREGADOS POR ADHERENCIAS SUPERFICIALES**

Muchas de las partículas que constituyen los agregados pétreos están recubiertas parcial o totalmente por la precipitación de carbonatos, sílice, material arcilloso/limoso, materia orgánica, sulfatos o por otros sedimentos los que dificultan seriamente su determinación. Es prácticamente una costumbre denominar a estos granos como “alteritas”, criterio que debe eliminarse ya que es peligroso su uso.

La depositación de carbonato de calcio sobre agregados gruesos naturales es muy común a partir de la precipitación de calcita desde aguas continentales circulantes o percolantes ya sea por saturación o por desecación, fenómeno que se manifiesta sobre sedimentos de cualquier composición. Al realizar observaciones aún con ayuda de un estereomicroscopio, sólo podrá observarse la superficie externa cubierta por calcita y no será posible identificar la composición litológica del clasto. Si está recubriendo una roca granítica o una partícula de cuarzo no ocasionará inconvenientes, pero si enmascara terrones blandos, arcillosos, vidrio volcánico o calcedonia o areniscas opalizadas será un problema serio.

Los componentes líticos de gravas y arena pueden estar enmascarados por sílice criptocristalina o por óxidos de hierro asociados con sílice, tornándolos reactivos. En el caso del carbonato, podría eliminarse la cobertura utilizando una solución ácida, pero la sílice es muy difícil.

Estos fenómenos no son los únicos, ya que es común que haya adherencias superficiales de sedimentos más finos que no permiten determinar al núcleo cubierto. Más raros son los enmascaramientos por materia orgánica los que podrían eliminarse utilizando peróxido de hidrógeno. Todos los problemas mencionados deben resolverse identificando la especie mineralógica y/o litológica ya sea mediante la eliminación de la capa externa que los oculta o mediante la utilización de secciones delgadas con microscopio de polarización.

En el agregado grueso se resuelve más fácilmente ya que los individuos de interés pueden ser estudiados en cortes delgados individuales. No es así con las arenas ya que se deberán aglutinar para su estudio utilizando alguna resina que permita obtener una pastilla que soporte el tratamiento al ser confeccionada la sección delgada. De esta forma es posible identificar a cada uno de los minerales o rocas que los componen.

## **9. PETROGRAFIA DEL HORMIGÓN**

### **9.1 Observaciones Macroscópicas**

El examen cuidadoso del hormigón en esta primera etapa es de fundamental importancia ya que permite definir su estado general, grado de deterioro, características de la fisuración, presencia de exudados, cambios de volumen, desprendimientos de determinados sectores y la relación con su emplazamiento.

Contribuye notablemente disponer de testigos del hormigón, ya que permite la determinación visual de las características del mortero, de la interfase pasta – agregado, presencia de fisuras, estado de conservación de la pasta, desarrollo de productos de neoformación (carbonato de calcio, portlandita, ettringita, yeso, zeolitas, etc.) y su extracción basándose en el tipo cristalino de cada especie apoyándose con estereomicroscopio para la observación de los detalles.

Algunos de estos materiales son fácilmente identificables por su desarrollo cristalino, tal es el caso de la ettringita ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ). Forman cristales blandos, muy finos, aciculares, los que a veces crecen como prismas cortos. Se desarrollan principalmente en el interior de cavidades de aire accidental. Si el hormigón se encuentra en un grado avanzado de deterioro cristaliza en el interior de microfisuras, tapiza la superficie, comúnmente en espacios abiertos. Los productos de la reacción álcali - sílice no son identificables con este método ya que constituyen materiales masivos sin desarrollo de cristales visibles con estereomicroscopio, debido a su pequeño tamaño. Sin embargo esta metodología es de gran ayuda para separar el material para su posterior análisis por otras técnicas tales como difracción de rayos X y SEM-EDS.

El carbonato de calcio puede presentarse tanto en forma masiva como en cristales característicos de calcita. En algunos casos dependiendo del medio (pH, presencia de cationes libres), también pueden cristalizar otros carbonatos. Con respecto a los agregados es posible determinar el grado y tipo de alteración, en especial la presencia de especies mineralógicas potencialmente deletéreas u otras que por sus características morfológicas podrían ser reactivas.

### **9.2 Estudios con Microscopio de Polarización**

El estudio del hormigón endurecido en secciones delgadas permite el análisis detallado de la composición petrográfico - mineralógica de los agregados gruesos y finos, las alteraciones que presentan y la determinación de las características de la pasta, porosidad, contenido de aire intencionalmente incorporado, presencia de fisuras y grado de deterioro.

El estudio con microscopio de polarización se puede dividir en dos etapas: estudio petrográfico de los agregados y estudio de la pasta y de la interfase pasta – agregado. Una vez estudiadas las características petrográfico - mineralógicas de los agregados, se evalúan las características del mortero. Se sugiere tener en cuenta las siguientes características:

Microfisuramiento: Debe determinarse si las microfisuras se encuentran dispersas en la pasta o tienen continuidad y afectan también a los agregados. En el primer caso son generalmente muy finas y se encuentran vacías (Fig. 3A). En cambio si estas fracturas tienen continuidad, afectan a los clastos de los agregados, son en general más anchas que las anteriores y están rellenas por un material que puede ser isótropo y/o anisótropo (Fig. 3B y C con luz paralela y nicoles cruzados respectivamente), el hormigón presenta signos de reacción. El producto desarrollado en el interior de las fracturas corresponde a aluminosilicatos. Interfase pasta - agregado: En hormigones sanos el contacto es neto, (Fig. 3D) mientras que si el hormigón presenta signos de deterioro, se observan bordes de reacción (Fig. 3E) contactos de carie, en algunos casos los clastos se presentan separados de la pasta y es frecuente observar productos de reacción desarrollados en los bordes de los clastos. Estado de la pasta: En hormigones sanos la pasta se presenta homogénea y las cavidades de aire accidental se encuentran vacías, mientras que en hormigones que presentan deterioro (Fig. 3F). Las cavidades están generalmente rellenas parcial o totalmente con ettringita

## **10 CONCLUSIONES**

La identificación de los minerales y rocas que constituyen los agregados en el hormigón es de vital importancia para determinar si existen componentes potencialmente deletéreos que puedan provocar reacciones deletéreas. En el caso que se haya presentado alguna patología, como puede ser el desarrollo de la reacción álcali - sílice permitirá concluir cuales fueron las especies responsables del deterioro.

Es ampliamente mencionado en la bibliografía que el cuarzo tensionado, microcristalino y de grano fino es considerado potencialmente reactivo frente a la RAS. Su velocidad de reacción es muy lenta por lo que en general no es detectado en los métodos de ensayo convencionales. El análisis petrográfico, permite la identificación de estos materiales con microscopio de polarización y podría alertar sobre su potencial reactividad y permitiendo fijar pautas que condicionen los ensayos complementarios.

El cuarzo tensionado se presenta tanto en agregados finos como gruesos constituyendo principalmente rocas metamórficas (cuarcitas), e incluso rocas graníticas que han sufrido procesos de deformación. En las rocas sedimentarias (areniscas silíceas), la matrix por lo general es criptocristalina o amorfa y por lo tanto, altamente lixiviable en el hormigón.

El vidrio volcánico presente en los agregados también es un material potencialmente deletéreo. Su presencia es fácilmente detectable por estudios petrográficos ya que se comporta como una sustancia amorfa. Se puede presentar fresco, en especial formando parte de los agregados finos, o constituyendo la pasta de rocas volcánicas vítreas. En este último caso puede presentarse fresco o alterado principalmente a minerales arcillosos del grupo de la montmorillonita.

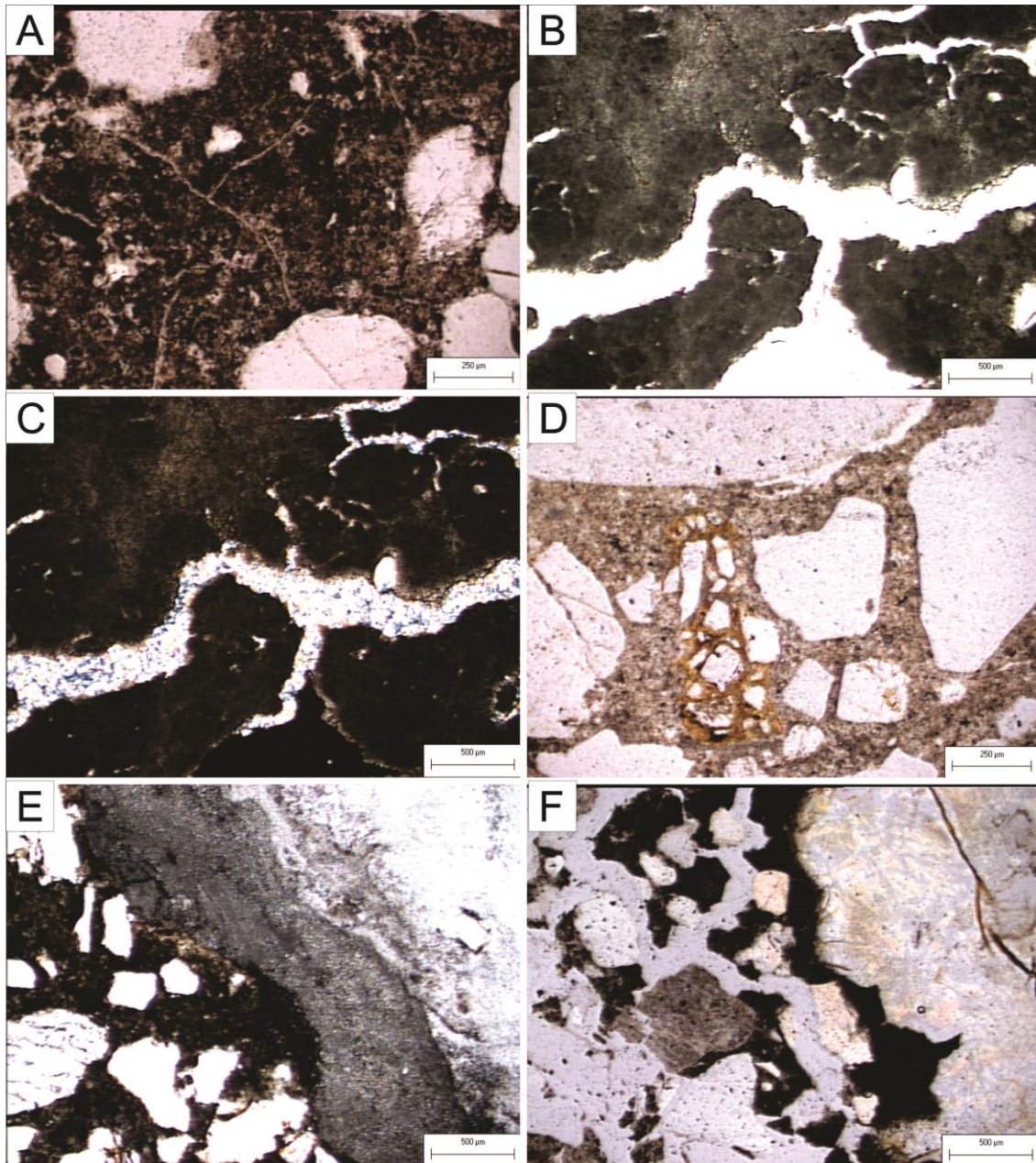
La calcedonia, tridimita y variedades de sílice criptocristalinas son altamente reactivas. Son frecuentes de encontrar como clastos aislados de areniscas o como fragmentos de rocas principalmente de origen volcánico (riolitas, riolacitas, dacitas).



Abundan en las crustificaciones superficiales de cantos rodados y agregados finos, individualmente o asociados a procesos de carbonatación y silicificación.

Cuando se realiza el estudio petrográfico de un agregado deben identificarse sus minerales de alteración. No se debe definir genéricamente, ya que pueden contener o no vidrio volcánico y si lo tienen, puede estar fresco o alterado.

Es muy importante evaluar el comportamiento que han tenido los agregados objeto de estudio, en estructuras en servicio.



*Figura 1: A. Fino microfisuramiento difuso en la pasta. B. Fisuras de mayor tamaño en 3 direcciones (con luz paralela) C. La misma imagen anterior con nicoles cruzados donde se observa que está rellena con un material anisótropo. D. Contacto agregado - mortero netos. E. Borde de reacción en la zona de contacto agregado - mortero. F. Mortero muy fisurado. Bordes de reacción.*

## 11 AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Dpto. de Geología de la UNS, a la Comisión de Inv. Científicas de la Prov. de Bs. As. y al Dr. Pedro Maiza por el apoyo brindado.

## 12 REFERENCIAS

- (1) Maiza, P. y Marfil, S. (2010), "Las rocas como materiales para hormigón", *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, N° 24, pp. 1-12.
- (2) IRAM 1649. (2008), "Examen petrográfico de agregados para hormigón", *Instituto Argentino de Normalización*, segunda edición.
- (3) IRAM 1531. (1968). "Aridos gruesos para hormigones de cemento portland". *Instituto Argentino de Normalización*,
- (4) IRAM 1512. (1968). "Arido fino natural para hormigón de cemento portland. *Instituto Argentino de Normalización*,
- (5) ASTM C-227. (1995). "Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates Mortar bar method". *Book of standards*, 04.02, 45.
- (6) IRAM 1637 (1992). "Reacción álcali-agregado. Método de la barra de mortero para la determinación de la reactividad alcalina potencial". *Instituto Argentino de Normalización*.
- (7) ASTM C-1260. (1990). "Accelerated method". *Book of standards*, 04.02, 739.
- (8) Norma IRAM 1674 (1997). "Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero". *Instituto Argentino de Normalización*. CNA 5610. ICS 91.100.20.
- (9) IRAM 1700. (1997) "Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado". *Instituto Argentino de Normalización*. CNA 5610. ICS 91.100.30-20.
- (10) ASTM C 289. (2008). "Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (Chemical Method)". *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates. Section Four Construction*, Vol. 04.02. pp. 179-185.
- (11) IRAM 1650. (1968). "Reactividad Alcalina Potencial en Áridos. Método de ensayo químico". *Instituto Argentino de Normalización*.
- (12) Dana, J.D. and Dana, E.S. (1951). *Manual of Mineralogy*. Vol. 2l. Ed. John Wiley and Sons Inc. p. 284.
- (13) ASTM C-294. (1981). "Standard descriptive nomenclature of constituents of natural mineral aggregates". *Annual Book of ASTM Standards*, Part. 14. Philadelphia, USA.
- (14) Chang, L.L., Howie, P.A. and Zussman, M.A. (1998). *Rock-forming minerals*. 2<sup>nd</sup>. Edition. Vol 1, 2, 3, 4 y 5.
- (15) Corneils, K. and Hurlbut, C.S. Jr. (1993). *Manual of Mineralogy*. After J. D. Dana. Ed. John Wiley and Sons Inc.
- (16) Bish, D. and Ming, D. (2001). *Natural zeolites: occurrence, properties, applications*. Reviews in mineralogy and Geochemistry, Vol. 45, Mineralogical Soc. of America. 654 pag. Washington D.C.
- (17) Williams, W., Turner, F.J. y Gilbert. (1968). *Petrografía*. Ed. Continental. México. p. 430.
- (18) Pettijohn, F. (1976). *Rocas Sedimentarias*. 3ra. Edición. Editorial Universitaria de Bs. As. p. 731.
- (19) Monttana, A., Sassi, F., Thompson, J. and Guggenheim, S. (2002). *Micas. Crystal chemistry and metamorphic petrology*. Rev. in mineralogy and geochemistry. Vol. 46. Washington D.C. p. 499.
- (20) Melgarejo, C. (1997). *Atlas de las asociaciones minerales en lámina delgada*. Coor. Joan Carls Melgarejo. Ed. Universitat de Barcelona. Barcelona. p. 1052.
- (21) González Bonorino, F. (1972). *Introducción a la Geoquímica*. OEA. Ed. Chesneau. Washington D.C. p. 140.
- (22) Delvigne, J.E. (1998). *Micromorphology of mineral alteration and weathering*. Ed. Mineralogical Association of Canada. Canadá. p. 494.